

带锯条铣齿切削量计算及工艺优化研究

刘国跃^{1,2}, 周志雄¹, 彭永清², 刘刚²

¹湖南大学; ²湖南泰嘉新材料科技股份有限公司

摘要: 针对带锯条铣齿加工常用的三段式加工工艺中切削量设计与精度要求不符的现象,综合考虑了成型铣刀刃口形状、空间运动形式以及锯齿形成的不同阶段,提出了以异形刃口离散的方法建立刃口切深与刃口作用长度关系模型。并在此基础上建立了带锯条成型铣刀单个刃口的切削量计算模型。以单圆弧过渡齿形为例,代入实际参数进行模拟计算,获得了带锯条铣齿加工过程中切削量以及刃口切削体积变化规律。结合带锯条实际加工对效率和精度的要求,提出了增加铣齿分段数量和控制吃刀量及切削体积的优化工艺方向。

关键词: 带锯条;成型铣;刃口;切削量

中图分类号: TG501.23;TH12

文献标志码: A

Study on Calculating Mode of Cutting Volume and Optimal Process for Forming Milling in Band Saw Blade Manufacture

Liu Guoyue, Zhou Zhixiong, Peng Yongqing, Liu Gang

Abstract: This paper is aimed at the traditional process of three segments in the band saw blade milling process whose cutting volume designing is mismatching with precision requirements. By discretizing tooth profiles, the relationship between the depth of the edge cutting into bi-metal blade and the acting length on the edge has been established. Then, the edge shapes, motion state and teeth forming progress have been considered to build the calculation model. Taking the tooth profile with single transition fillet for example, the changing way for the cutting depth and the cutting volume on the single cutting edge are found under real parameters. According to the efficiency and precision requirements for the band saw blade milling, the optimal process of adding more segments with different feed rates and controlling the cutting volume is proposed.

Keywords: band saw blade; forming milling; edge; cutting volume

1 引言

在切削加工中,切削量的计算是作为切削参数选择合理性的重要理论依据之一^[1-4]。目前对于切削量计算常用方法有解析法和有限元模拟^[5]。使用解析法的一般过程为对切削过程进行运动学建模,然后根据模型做数值离散编程,模拟切削过程中切削量的变化^[6-8]。

使用铲背成型铣刀成形锯齿及齿沟是带锯条生产中常用的加工方式,其切削用量的选择对毛刺以及加工表面质量的影响非常大^[8]。在实际生产中,由于所生产齿型多达数十种,而且每种齿型几何特征各异,采用的加工参数也不同,如果采用常规计算方法会产生非常大的计算量。同时,由于刃口的形状不规则,锯齿成形过程中,每个刃口起作用的刀刃长度会随刃口的切入深度而变化,难以建立起刃口上各点的切削模型。因此,目前生产现场较少通过

切削量计算的方法设计优化工艺。现行的带锯条铣齿加工工艺一般采用三段式,即从铣刀开始接触复合钢带到铣刀刃口完全脱出钢带的整个过程中采用三种不同进给速度。这种方法相对较为粗糙,往往根据经验将进给速度设置为慢、快、更快的排序方式。工艺弊端非常明显,往往在锯齿成型阶段(要求精细加工的阶段)反而切削量最大。

2 带锯条成型铣刀及锯齿成型过程

带锯条常用多刃滚齿铣刀,由于采用成组齿形设计方法,一把铣刀上的刃口数目为一组齿数乘以槽数的一半,如以泰嘉新材公司的2/3齿形为例,五齿为一组(如图1所示,五个齿形状及间距皆不同),铣刀槽数为16,铣刀上刃口数目为40。

成品带锯条的锯带厚度为0.65-1.6mm(依据宽度规格的不同而厚度不同)。在锯齿的成型铣齿加工中,一般将多根(10-40根不等)复合钢带叠起并夹紧进行加工。加工方式一般为逆铣(见图2),铣刀顺时针转动而铣刀轴心沿X轴方向进给加工。

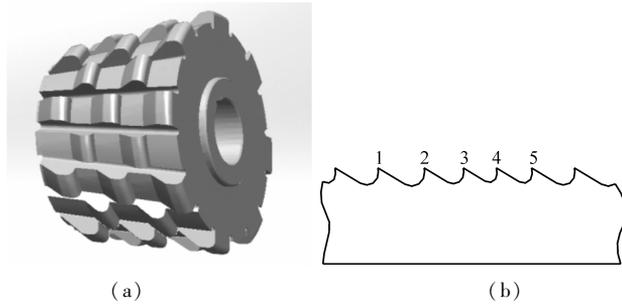


图1 带锯条铣刀与齿形

从铣刀刃口上切削量变化来看,可以将带锯条铣齿过程分为三个阶段:铣刀入切阶段、锯齿成型阶段以及铣刀切出阶段。铣刀切入阶段是指铣刀回转中心从铣刀刃口刚接触复合钢带原材料的位置移动至带锯条锯齿开始成型位置,即铣刀从图2a的 O_{10} 位置移动至图2b中 O_{11} 位置,此阶段铣刀刃口的切削量增加。同时从图2a、图2b和图2c对比来看,铣刀的切入阶段是铣刀在 X 方向进给长度最大的阶段,而此阶段由于铣刀刃口未完全没入复合钢带,带锯条锯齿并未成型。因而,如果需要提升带锯条铣齿加工效率且同时保证质量,在铣刀切入阶段提升进给速度是较为恰当的方法。锯齿成型阶段指的是铣刀刃口高度完全没入复合钢带而又未切出的状态,即在 X 轴方向上从 O_{11} 运动到 O_{12} 位置(见图2b和图2c)。此阶段铣刀刃口的切削量稳定,锯齿在此阶段开始成型。铣刀切出阶段见图2c,铣刀转心从 O_{12} 运动到 O_{13} 位置,铣刀刃口切入复合钢带的轨迹线变短,刃口切削量减少,切削力随铣刀进给而减小。此阶段锯齿成型,当铣刀轴线脱离复合钢带最右侧,带锯条锯齿完成成型加工。

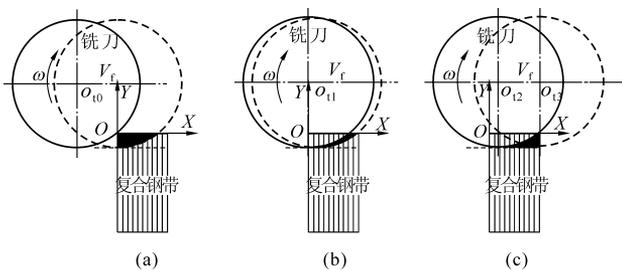


图2 带锯条铣齿三个阶段

3 单刃口切削量计算模型

铣刀刃口数量非常多,计算每一个刃口的切削量来作为工艺优化的参考值,会导致计算量非常大。同时,在加工过程中,所有齿形刃口一起运动,其切削量变化趋势一致。因此,将整组齿离散为单独的齿形刃口,通过计算单个齿形刃口切削量来表征整

个铣刀的切削量变化趋势是可行的,而且能够减少计算量。考虑到各个刃口的尺寸不同,为避免整体切削量过大,在计算时,应该以成型带锯条最大齿沟的铣刀刃口作为计算对象。

要计算单刃切削体积,需知刃口的吃刀量、参入切削的刃口长度以及切入复合钢带的刃口轨迹线长度。将铣刀周向上相邻前后两个刃口的轨迹相减,可以得到后一个刃口的吃刀深度。

基于上述原则对铣刀入切阶段刃口切削量进行计算。设 A_n 为第 n 个刃口入切工件与 X 轴的交点,而 B_n 则是刃口 n 脱离工件与 Y 轴的交点(见图3)。铣刀轴线到工件高度为 h_1 。设 O_n 的 X 坐标为 $(x_{o,n}, h_1)$,轴线初始坐标为 $(x_{o,0}, h_1)$,刃口 n 与 X 轴相交的角度 α_n ,与 Y 轴相交的角度为 β_n ,铣刀进给速度为 v_f (mm/min)。从刃口 $n-1$ 到刃口 n 所耗费的时间为

$$t_{n,n-1} = \frac{1}{n\omega} \quad (1)$$

式中, ω 为转速(r/min)。

刃口 n 的切入复合钢带的角度为

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} = -\sin^{-1} \frac{h_1}{R} \quad (2)$$

从刃口 $n-1$ 转动刃口 n 时间内,铣刀转心 O 在 X 方向移动的距离为

$$L_{n-1,n} = v_f t_{n,n-1} \quad (3)$$

铣刀转动角度 α_1 为

$$\alpha_1 = 2\pi\omega t \quad (4)$$

将刃口吃刀深度分为三个阶段:①刃口轨迹与 X 轴的交点在 A_{n-1} 至 A_n 的范围内,吃刀深度 a_{pn} 为刃口顶端至 X 轴的长度;②刃口 $n-1$ 轨迹与 X 轴的交点从 A_{n-1} 至 Y 轴的交点 B_{n-1} 范围内,吃刀深度 a_{pn} 为刃口 $n-1$ 与刃口 n 之间轨迹差值;③刃口轨迹与 Y 轴的交点从 B_{n-1} 至 B_n 的范围内。根据几何关系,可以得到 a_{pn} 的计算式为

$$\alpha_{pn} = \begin{cases} R - \frac{h_1}{\sin\alpha_1} \\ \left(-\sin^{-1} \frac{h_1}{R} \geq \alpha_1 \geq -\tan^{-1} \frac{h_1}{\sqrt{R^2 - h_1} - L_{n-1,n}} \right) \\ R + L_{n-1,n} \cos\alpha_1 - \sqrt{R^2 - L_{n-1,n}^2} \\ \left(-\tan^{-1} \frac{h_1}{\sqrt{R^2 - h_1} - L_{n-1,n}} \geq \alpha_1 \geq \tan^{-1} \frac{\sqrt{R^2 - x_{o,n-1}}}{x_{o,n}} \right) \\ R - \frac{|x_{o,n}|}{\cos\alpha_1} \\ \left(\tan^{-1} \frac{\sqrt{R^2 - x_{o,n-1}}}{x_{o,n}} \geq \alpha_1 \geq \tan^{-1} \frac{|x_{o,n}|}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

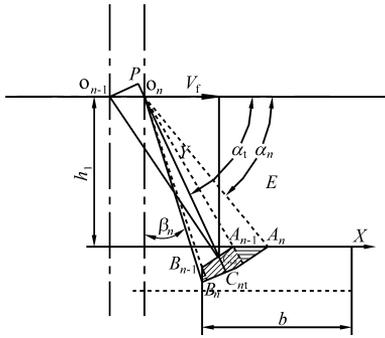


图 3 铣刀切入阶段切削量

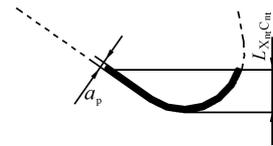


图 4 刃口没入复合钢带深度与起作用刃口长度

在实际切削过程中,刃口并不是全部切入到复合钢带中,而是随着铣刀转动而逐渐没入。刃口切入工件深度与起切削作用的刃口长度呈一一对应关系。因此,刃口切入复合钢带的深度计算式为

$$L_{X_{nt}C_{nt}} = \begin{cases} R - \frac{h_1}{\sin\alpha_1} & -\sin^{-1}\frac{h_1}{R} \geq \alpha_1 \geq -\tan^{-1}\frac{h_1}{x_{o,n}} \\ R - \frac{|x_{o,n}|}{\cos\alpha_1} & -\tan^{-1}\frac{h_1}{x_{o,n}} \geq \alpha_1 \geq -\cos^{-1}\frac{|x_{o,n}|}{R} \end{cases} \quad (6)$$

图 4 为刃口切入深度为 $L_{X_{nt}C_{nt}}$ 所对应的切削作用刃长度 $E_{X_{nt}C_{nt}}$,对于不同刃口形状只需要离散为切入深度 $L_{X_{nt}C_{nt}}$ 与起作用的刃口长度矩阵 $E_{X_{nt}C_{nt}}$ 便可以计算出切削面积,即

$$S_{a_t} = E_{X_{nt}C_{nt}} L_{X_{nt}C_{nt}} \quad (7)$$

计算得到第 n 个刃口的切削体积 V_n 为

$$V_n = \int_{-\sin^{-1}\frac{h_1}{R}}^{\tan^{-1}\frac{|x_{o,n}|}{R}} s_{\alpha_1} da \quad (8)$$

根据铣刀切入阶段的计算同样可以得到锯齿成型阶段以及切出阶段吃刀深度起作用刃口长度的计算公式。锯齿成型阶段吃刀深度为

$$a_{pn} = \begin{cases} R - \frac{h_1}{\sin\alpha_1} & (-\sin^{-1}\frac{h_1}{R} \geq \alpha_1 \geq -\tan^{-1}\frac{h_1}{\sqrt{R^2 - h_1} - L_{n,n-1}}) \\ R + L_{n,n-1} & (\cos\alpha_1 - \sqrt{R^2 - L_{n,n-1}^2} - \tan^{-1}\frac{h_1}{\sqrt{R^2 - h_1} - L_{n,n-1}} \geq \alpha_1 \geq -\frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (9)$$

刃口切入深度的计算式为

$$L_{X_{nt}C_{nt}} = R - \frac{h_1}{\sin\alpha_1} \quad (10)$$

式中, $-\sin^{-1}\frac{h_1}{R} \geq \alpha_1 \geq -\frac{\pi}{2}$ 。

铣刀切出阶段吃刀量计算公式为

$$a_{pn} = R + L_{n,n-1} \cos\alpha_1 - \sqrt{R^2 - L_{n,n-1}^2} \quad (11)$$

式中, $-\cos^{-1}\frac{b - x_{on}}{R} \geq \alpha_1 \geq -\frac{\pi}{2}$ 。

切出阶段刃口切入深度计算式为

$$L_{X_{nt}C_{nt}} = R - \frac{h_1}{\sin\alpha_1} \quad (12)$$

式中, $-\cos^{-1}\frac{b - x_{on}}{R} \geq \alpha_1 \geq -\frac{\pi}{2}$ 。

4 模拟计算

带锯条锯齿的齿形相对较多,以较为常见的齿沟底部单圆弧过渡齿形(见图 6)为例进行分析。根据齿形几何特征建立切入深度 $L_{X_{nt}C_{nt}}$ 与起作用刃口长度的矩阵 $E_{X_{nt}C_{nt}}$ 关系式为

$$E_{X_{nt}C_{nt}} = \begin{cases} 2R \cos^{-1}\frac{R - L_{X_{nt}C_{nt}}}{R}, (R - R \cos J_2 \geq L_{X_{nt}C_{nt}}) \\ R \cos^{-1}\frac{R - L_{X_{nt}C_{nt}}}{R} + R J_2 + \left| \frac{L_{X_{nt}C_{nt}} - R + R \cos J_2}{\sin J_2} \right| \\ (R + R \sin J_1 \geq L_{X_{nt}C_{nt}} \geq R - R \cos J_2) \\ R(J_1 + J_2 + \frac{\pi}{2}) + \left| \frac{L_{X_{nt}C_{nt}} - R - R \cos J_2}{\sin J_2} \right| + \left| \frac{L_{X_{nt}C_{nt}} - R - R \sin J_1}{\cos J_1} \right| \\ (H \geq L_{X_{nt}C_{nt}} \geq R + R \sin J_1) \end{cases} \quad (13)$$

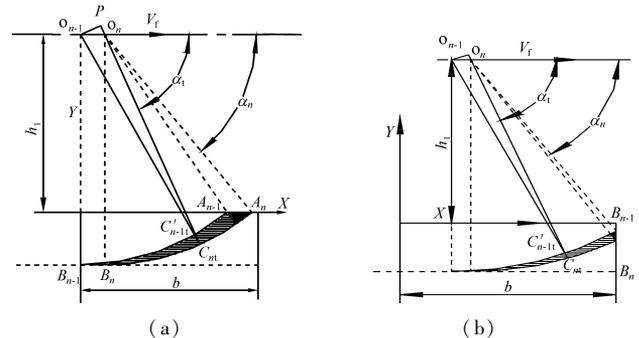


图 5 锯齿成型阶段以及切出阶段

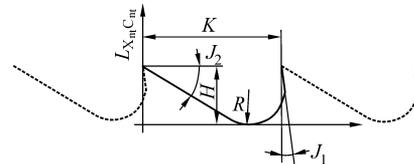


图 6 齿沟单圆弧过渡齿形

代入参数 $H = 3.58$ 、 $J_1 = 0.174$ 、 $J_2 = 0.54$ 、 $R = 2.64$ 。假设进给速度为 $v_f = 20\text{mm}/\text{min}$ 、 $\omega = 80\text{r}/\text{min}$ 、铣刀半径为 90mm 。计算所得到的刃口轨迹线见图 7,需要说明的是由于实际刃口轨迹线非常密集,该图为轨迹线简化图。

图 8a 为单个刃口的吃刀深度与铣刀进刀位置

之间的关系。从图 8a 可知,刃口在刚切入复合钢带位置(见图 3 和图 5 中 A_n 位置)时吃刀量最大,为 $4.4\mu\text{m}$ 。随着铣刀转动,吃刀量减少,切出复合钢带时,吃刀量小于 $1\mu\text{m}$ 。同时,在铣刀水平进给过程中,刃口吃刀量变化不大。从图 7 的刃口轨迹线也能看出这种规律。即,如果采用单一进给速度,刃口吃刀深度不会产生较大变化。其次,刃口上最先接触复合钢带的位置是其顶部位置,该位置由于吃刀深度大且参与切削时间长,相对其他位置磨损较大。

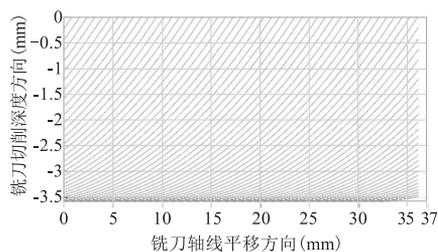


图 7 铣刀刃口轨迹线

图 8b 为铣刀在不同进给位置时刃口所产生的切削体积变化。在铣刀入切阶段,随着铣刀水平方向进给,刃口的切削体积增加;当进给到锯齿成型阶段时,切削体积保持不变,而在铣刀切出阶段时,则随进给增加而下降。

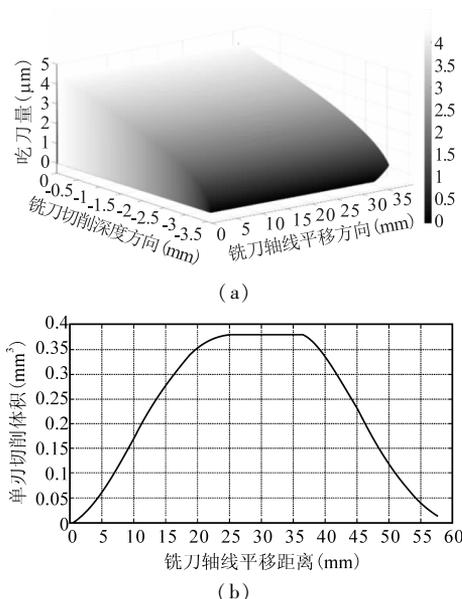


图 8 单个刃口吃刀深度及切削体积

结合计算结果及锯齿成型过程可知,在锯齿成型以及铣刀切入阶段,需要控制吃刀深度以及切削量,以获得较好的表面质量和加工精度。同时,为了避免因切削体积的变化过大而引起铣刀轴向窜动增加,应该增加分段数量,尽量减少切削体积变化量。因此,对于带锯条的成型铣齿过程应该采取以下方法:①增加分段数量;②进给速度应该按照“快—更

快—慢—再慢—快—更快”的方式排序。在刚切入复合钢带的入切阶段,为了避免撞刀以及振动过大所致的崩刃,速度相对较慢,但为了提高效率可以比锯齿成型阶段更快。待铣刀进给一段距离后,增加进给速度以提升效率。锯齿成型阶段应该采用最慢的进给速度,因为此时切削体积较大且同时锯齿成型。在铣刀切出阶段,切削体积下降,可以适当增加进给和铣刀转速,即采用较小切削深度的同时可以避免切削体积产生较大变化。

5 结语

(1)将带锯条铣齿过程分为:铣刀入切、锯齿成型以及铣刀切出三个阶段。综合考虑了成型铣刀刃口形状、空间运动形式,提出了用异形刃口离散的方法建立刃口切深与刃口作用长度关系模型,并以此建立了铣刀单刃口切削量计算模型;

(2)在计算结果的基础上,提出了带锯条的铣齿工艺应该向“增加分段数”和“进给速度按:快—更快—慢—再慢—快—更快排序”的方向优化工艺。这种方式相较于传统三段式“慢—快—更快”,能够提升加工质量和效率。

参考文献

- [1]陆剑中,孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2]安珍,田金芳. 刀具前角与切削量对柠条材切削力影响的研究[J]. 林业机械与木工设备,2010,38(2):22-24.
- [3]潘敏强,刘亚俊,汤勇. 车削加工中切削用量的分层多目标最优化模型[J]. 工具技术,2005(8):29-33.
- [4]崔政,陈南,季鹏. 切削用量对切削力和切削振动的影响[J]. 机床与液压,2016(7):10-13.
- [5]高爱华,张建新. 基于正交切削模型的铣削加工有限元仿真[J]. 工具技术,2012,46(6):30-32.
- [6]阎长罡,于建斌. MATLAB 在切削用量优化中的应用[J]. 机械设计与制造,2009(2):81-83.
- [7]张镇. 螺旋面成型铣刀可视化设计软件开发与加工仿真[D]. 沈阳:东北大学,2009.
- [8]田丰,杨迎新,任海涛. PDC 钻头切削齿工作区域及切削量的分析理论和计算方法[J]. 钻采工艺,2009(2):51-53.

第一作者:刘国跃,博士后,湖南大学机械与运载工程学院,湖南泰嘉新材料科技股份有限公司,410082 长沙市

First Author: Liu Guoyue, Post-doctoral, HNU College of Mechanical and Vehicle Engineering, Bichamp Cutting Technology (Hunan) Co., Ltd, Changsha 410082, China